

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO PARIGOT

RELAÇÃO ENTRE A UMIDADE E O PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA
UTILIZADA NA COCELPA

CURITIBA
2014

PEDRO PARIGOT

RELAÇÃO ENTRE A UMIDADE E O PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA
UTILIZADA NA COCELPA

Trabalho de conclusão de curso de
graduação apresentado à disciplina de
Estágio Profissionalizante em Engenharia
Industrial Madeireira – AT063 do Curso de
Engenharia Industrial Madeireira do Setor
de Ciências Agrárias da Universidade
Federal do Paraná

Orientador: Prof. Dr. Rui Maggi dos Anjos

CURITIBA
2014

RESUMO

O objetivo deste estudo foi construir uma relação entre o teor de umidade da biomassa, em forma de cavacos, e seu poder calorífico. Foram coletadas 48 amostras no momento da descarga do caminhão no pátio da empresa de janeiro a março de 2014. As amostras foram retiradas de diversos pontos da pilha de cavacos formada no momento da descarga do caminhão. As amostras foram então embaladas e seladas em sacos plásticos e encaminhadas para o Laboratório de Energia de Biomassa Florestal e Bioenergia da Universidade Federal do Paraná para serem analisadas. Seguiu-se a norma NBR 7993 da ABNT – Madeira para a determinação da umidade e a norma NBR 8633 da ABNT para a determinação do poder calorífico. As amostras apresentaram um teor de umidade entre 8% e 60% e poder calorífico líquido entre 1300 e 4200 (kcal/kg). Com esses resultados foi realizada uma análise de regressão linear. A análise de regressão mostrou que a relação entre o poder calorífico líquido e o teor de umidade na base úmida é linear e a equação gerada utilizando-se as análises realizadas pode ser empregada pela empresa para se determinar o poder calorífico usando o teor de umidade com erros pouco significativos.

Palavras-chave: Biomassa. Poder calorífico. Teor de umidade.

ABSTRACT

The purpose of this study was to generate a relation between the moisture content of the biomass, in the form of chips, and its heat value. There were 48 samples collected in the moment the truck unloaded at the company patio from January 2014 to March 2014. The samples were collected from different points of the pile in the same moment the truck unloaded. The samples were collected and sealed in plastic bags and sent to the Forest Biomass Energy and Bioenergy Laboratory at the Universidade Federal do Paraná. The standard NBR 7993 from ABNT was used for the moisture content determination and the standard NBR 8633 from ABNT for the calorific value determination. Samples had moisture content ranging from 8% to 60% and calorific value ranging from 1300 to 4200 (kcal/kg). With the results, a correlation analysis was generated. The regression analysis showed that the relation between heat value and moisture content is linear and the equation generated using the results from the analysis can be used by the company to estimate the heat value having the moisture content with minimum error.

Key words: Biomass. Calorific value. Moisture content.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GERAL.....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	DEFINIÇÃO DE BIOMASSA	12
3.2	ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO	12
3.3	ESPÉCIES FLORESTAIS UTILIZADAS PELA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE NO BRASIL	13
3.4	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	14
3.4.1	Composição química.....	14
3.4.1	Umidade.....	16
3.4.2	Como o teor de umidade interfere no poder calorífico líquido.....	17
3.5	PODER CALORÍFICO	18
3.5.1	Definição	18
3.5.2	Poder Calorífico Superior.....	18
3.5.3	Poder Calorífico Inferior	19
3.5.4	Poder Calorífico Líquido.....	20
3.6	TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA MADEIRA ..	20
3.6.1	Combustão da Biomassa	21
3.6.2	Pirólise	22
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1	COLETA DE AMOSTRAS	24
4.2	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	24
4.3	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO	24
4.4	ANÁLISE DOS DADOS	24
5	RESULTADOS	27
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é usada como fonte de energia desde tempos imemoriais. A biomassa de madeira é largamente usada para fins energéticos e apresenta características que a tornam muito interessante do ponto de vista ambiental e econômico.

Sob o ponto de vista energético e industrial a madeira é utilizada na conversão da energia de ligação química decorrente dos seus arranjos moleculares para energia térmica que em seguida é usada para fins desde produção de carvão até produção de energia elétrica. O uso mais frequente é na geração de vapor d'água que é utilizado pelas diversas máquinas presentes na indústria madeireira.

O setor de papel e celulose no Brasil é composto 222 empresas que detêm 31 plantas de produção de celulose, 226 plantas de papel, 44 plantas de produção de pastas de alto rendimento e 51 plantas de produção de celulose e papel integradas. O setor é caracterizado pelo uso intensivo de energia em seus processos produtivos. Em 2010 o setor respondeu por cerca de 4,5% de toda energia consumida no Brasil sendo que a energia térmica é a componente mais expressiva. Apesar do intenso uso de energia, o setor se destaca pelo fato de usar fontes renováveis e de baixo impacto ambiental. Dados mostram que em 1970 cerca de 60% da matriz energética do setor era proveniente de combustíveis fósseis, em 1980 era 50%, em 2001 era 20,6%, em 2005 era 16,5% e em 2010 eles representavam apenas 12% do total (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2012), (Bracelpa, 2011).

As plantas de celulose no Brasil têm basicamente dois meios diferentes para utilizar a energia térmica contida na madeira. A primeira delas é em forma sólida, sendo madeira ou outros resíduos, como a casca das árvores, queimados na caldeira de biomassa. A segunda é em forma líquida, mais especificamente o licor negro, ou lixívia, resultante do processo de cozimento da madeira, que é constituído de lignina e sais de sódio que depois da combustão do licor fundem e são recuperados para serem transformados novamente em licor branco e voltar ao processo de cozimento.

O uso da madeira como combustível requer certos conhecimentos para melhor aproveitamento da energia. Dentre os fatores que mais influenciam o aproveitamento da energia de um combustível, destaca-se o conteúdo de água

presente no material, ou seja, seu teor de umidade. A influência do teor de umidade na capacidade de gerar energia térmica, ou poder calorífico, é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o teor de umidade, menor o poder calorífico.

Outras características como granulometria, tempo de estocagem, condições climáticas durante a estocagem, origem (restos de podas, artefatos de madeira como palets, cascas de madeira) e espécie são fatores que influenciam em menor grau a qualidade e a capacidade de gerar calor da biomassa (BRAND, 2007)

Visando a grande importância que a energia tem para empresas de papel e celulose e sabendo que a maior parcela deste insumo vem de resíduos florestais, devemos entender quais características e parâmetros são importantes para atingir o melhor aproveitamento na geração de calor. Muitas empresas, como é o caso desta do presente estudo, têm a necessidade de comprar cavacos de madeira especificamente para gerar energia térmica. Para isso faz-se necessário uma boa avaliação do material que se adquire. Analisar o poder calorífico de toda carga torna-se inviável por causa do tempo e valor exigido para tal. Uma outra alternativa pode ser correlacionada com o poder calorífico com algum outro parâmetro de fácil análise.

O estudo realizado visou estabelecer a relação entre o poder calorífico e a característica que mais influencia a capacidade da biomassa em gerar calor, que é o teor de umidade presente no material. Além disso, a análise de umidade pode ser feita facilmente, sem exigir equipamentos complexos, por um preço relativamente baixo e em um curto período de tempo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Sabendo que a biomassa é muito importante para a indústria de papel e celulose e que certas características e propriedades afetam diretamente sua capacidade de gerar calor, este estudo visa determinar duas variáveis, o teor de umidade e o poder calorífico líquido, para então tentar estabelecer a relação entre elas. Em seguida pretende-se modelar equações para a estimativa do poder calorífico líquido sabendo-se o teor de umidade, que pode ser determinado facilmente dentro da própria empresa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinar o teor de umidade da biomassa;
- b) Determinar o poder calorífico da biomassa;
- c) Estabelecer a relação entre a umidade da biomassa utilizada na Cocalpa e seu poder calorífico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DEFINIÇÃO DE BIOMASSA

A biomassa é um termo genérico para o conjunto de recursos biologicamente renováveis originados de material vegetal. É considerada uma forma de energia solar armazenada, pois os vegetais usam a energia solar para realizar fotossíntese e com isso convertem o dióxido de carbono (CO_2), a água (H_2O) e o gás oxigênio (O_2) em produtos de alto teor energético como a lignina, a celulose e a hemi-celulose, que formam a maior parte dos vegetais (SOUZA; SORDI; OLIVA, 2002).

3.2 ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO

Provenientes de diversas fontes, esses recursos biologicamente renováveis são muitas vezes considerados resíduos, que são: “Remanescente. Aquilo que resta de qualquer substância; resto. O resíduo que sofreu alteração de qualquer ação exterior, por processos mecânicos, químicos, físicos, etc.: resíduos de um incêndio; os resíduos da moagem do café”, segundo o Dicionário Aurélio (2013).

A diversidade da origem da biomassa é ampla: restos de madeira de operações florestais, restos de plantações, resíduos industriais, resíduos agrícolas, plantas energéticas como a cana de açúcar e óleo proveniente de plantas oleaginosas (MANO, 2000).

Os usos mais comuns para a biomassa dentro da cadeia produtiva florestal variam da produção de energia à manutenção natural da fertilidade do solo. De acordo com Maron et al. (2002), os resíduos florestais são os materiais que sobram da operação de colheita florestal, sendo classificados como resíduos florestais, partes de árvores quebradas, toras com diâmetro menor do que as mínimas para determinado uso e as partes superiores das árvores.

Outro autor (SILVA, 2001) considera resíduos florestais os resíduos que são gerados e deixados na floresta como resultado das atividades da colheita de árvores. Esses resíduos são partes da árvore que não são aproveitadas pela indústria. Para Marcene et al. (2005), resíduo florestal é toda a biomassa residual, seja ela lenhosa ou não, produzido durante o processo de colheita das árvores.

Segundo Marcene et al. (2005), os resíduos de madeira podem ser classificados em basicamente três grupos distintos:

- a) Resíduo florestal: proveniente de plantações e florestas nativas;
- b) Resíduo industrial: proveniente de indústrias;
- c) Resíduo urbano: proveniente de áreas urbanas.

3.3 ESPÉCIES FLORESTAIS UTILIZADAS PELA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE NO BRASIL

A indústria de celulose e papel começou no Brasil no estado do Paraná pela farta oferta de madeira do pinheiro-do-paraná, de nome científico *Araucaria angustifolia*, no início da década de 1940, adotando como método de produção o processo sulfito e soda/enxofre. Na década seguinte foi instalada a primeira fábrica baseada no processo Kraft (KLOCK, 2006).

Atualmente a indústria de papel e celulose está presente em vários estados brasileiros e conta com a utilização de algumas espécies florestais para a fabricação da celulose, sendo as espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* as principais e chegam a representarem 98% do volume utilizado para esse fim, considerando que outras plantas, não-madeiras, como bambu, babaçu, sisal, palha de arroz, bagaço de cana-de-açúcar representam os outros 2% restantes. Dos atuais 7,2 milhões de hectares de árvores plantadas, incluindo pinus, eucalipto, acácia, araucária, paricá, teca, bracatinga, dentre outras, 37% é para a indústria de papel e celulose (Conjuntura Bracelpa).

3.4 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

3.4.1 Composição química

A composição química elementar de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (W) e cinzas (A). É a característica técnica mais importante do combustível. A composição imediata de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo (F), voláteis (V), umidade (W) e cinzas (A) (BRAND, 2010).

Os laços existentes entre as moléculas de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) podem ser rearranjados para permitir que substâncias com menor energia de ligação sejam formadas, possibilitando extrair energia desse processo. Os processos que permitem isso podem ser descritos por combustão, digestão ou decomposição. A biomassa como fonte de matéria prima de conversão depende das propriedades químicas e físicas das suas moléculas (BRAND, 2010).

Outros materiais presentes, mas em menor quantidade, são: nitrogênio (N), enxofre (S) e cinzas (A). As cinzas são compostas de materiais que não são relevantes nas reações de combustão, como potássio (K), fósforo (P), magnésio (Mg), cálcio (Ca), silício (Si), dentre outros, não representando mais que 2% no caso de madeiras, tanto de coníferas como de folhosas (NOGUEIRA & LORA, 2003).

Nas Tabelas 1 e 2 estão explicadas as composições elementar de alguns tipos de biomassa.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA (BASE SECA)

Tipo de Biomassa	Composição elementar da biomassa (% base seca)					
	C	H	O	N	S	A
Pínus	49,25	5,99	44,36	0,06	0,03	0,30
Eucalipto	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,72
Casca de arroz	40,96	4,30	35,86	0,40	0,02	18,34
Bagaço de cana	44,80	5,35	39,55	0,38	0,01	9,79
Casca de coco	48,23	5,23	33,19	2,98	0,12	10,25
Sabugo de milho	46,58	5,87	45,46	0,47	0,01	1,40
Ramas de algodão	47,05	5,35	40,77	0,65	0,21	5,89

FONTE: JENKINS (1990) CITADO POR CORTEZ, LORA & GÓMEZ (2008).

TABELA 2 – COMPOSIÇÃO IMEDIATA DA BIOMASSA (BASE SECA)

Tipo de Biomassa	Composição imediata (%)		
	V	A	F
Pínus	82,54	0,29	17,70
Eucalipto	81,42	0,79	17,82
Casca de arroz	65,47	17,89	16,67
Bagaço de cana	73,78	11,27	14,95
Casca de coco	67,95	8,25	23,80
Sabugo de milho	80,10	1,36	18,54
Ramas de algodão	73,29	5,51	21,20

FONTE: JENKINS (1990) CITADO POR CORTEZ, LORA & GÓMEZ (2008).

Os elementos químicos combinados formam as substâncias orgânicas da madeira como os polímeros, carboidratos e extrativos. Os carboidratos formam a celulose e polioses e os polímeros formam a lignina. A lignina é rica em carbono. O poder calorífico superior do carbono puro vale 8049 kcal/kg, que dentre os elementos que constituem a madeira é o que mais produz energia térmica na combustão, fazendo com que a lignina tenha um alto poder calorífico superior de 5995 kcal/kg. A Tabela 3 mostra a propriedade energética de algumas substâncias presentes na madeira. Os extrativos também tem um PCS maior que a própria madeira e isso é observado pelo maior PCS da casca e das madeiras de coníferas em relação à madeira de folhosa pelo fato da casca e as madeiras de coníferas apresentarem maior quantidade de extrativos (BENABDALLAH citado por BRAND, 2007), (NOGUEIRA & LORA, 2003).

TABELA 3 – PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DOS COMPONENTES DA BIOMASSA

Combustíveis	
Material	PCS (kcal/kg)
Amido	3797
Açúcar	3797
Celulose	3797
Madeiras de Folhosas	4600
Madeiras de Coníferas	4700
Casca	4991
Lignina	5995
Carbono Puro	8049

FONTE: BENABDALLAH CITADO POR BRAND (2007), NOGUEIRA & LORA (2003)

3.4.1 Umidade

A umidade é a quantidade de água presente em determinado material. A madeira é um material higroscópico, portanto é capaz absorver água do meio em que está. Há basicamente três maneiras distintas de como a água está presente na madeira (MORESCHI, 2005).

A água livre, ou água de capilaridade, é aquela que se encontra nas cavidades celulares, o lúmen dos elementos vasculares. A quantidade desse tipo de água é limitada pelo volume poroso da madeira, ou, em outras palavras, pelos espaços ociosos que existem dentro da madeira. Durante a secagem da madeira, a água livre é a primeira forma de água a sair, e isso acontece facilmente pela evaporação. No momento em que não existe mais a presença de água livre, a madeira estará no que chama-se de ponto de saturação das fibras (PSF), que geralmente ocorre quando o teor de umidade está em torno de 28 a 32% na base úmida. Quando a madeira alcança essa condição, suas paredes celulares estão completamente saturadas de água, mas seus espaços ociosos, ou lúmens, estão vazios (MORESCHI, 2005).

A água de impregnação é a água que se encontra impregnada nos espaços submicroscópicos das paredes celulares e suas moléculas estão arranjadas em camadas polimoleculares, ligadas por forças polares (MORESCHI, 2005).

Outra forma pela qual a água pode estar contida na madeira é chamada de água de adsorção química. Como define Moreschi,

o termo adsorção refere-se à capacidade de assimilação espontânea de água pela madeira, decorrente de um aumento de vapor de água na atmosfera, até que se atinja um equilíbrio entre a umidade da madeira e a do ambiente. Este fenômeno depende do teor de umidade atual da madeira e da umidade existente no ar, que se relaciona à umidade relativa e à temperatura do ar do ambiente em que a madeira se encontra, condicionando-a a se equilibrar com maior teor de umidade (MORESCHI, 2005).

A ligação entre as moléculas de água e a interface existente entre moléculas de celulose e moléculas de hemicelulose acontece por forças de valências secundárias mononucleares, forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio (MORESCHI, 2005).

Apesar de a umidade poder ser expressa na base seca e na base úmida, o ideal, quando consideramos amostras para biomassa, é o uso do teor de umidade

na base úmida, pois este expressa a quantidade de água no peso total da amostra que está sendo avaliada (BRAND, 2010).

O teor de umidade da madeira pode ser determinado de cinco maneiras diferentes: secagem em estufa, destilação, titulação, utilização de elementos higroscópicos e pela determinação de certas propriedades elétricas (KOLLMANN, CÔTÉ, 1968).

O método da secagem em estufa, em geral, é o mais preciso, mas é demorado e requer que as amostras sejam cortadas do material. Cada amostra é pesada e imediatamente colocada na estufa aquecida de 100 a 103°C e mantida até o peso não variar mais. Estufas elétricas são as mais utilizadas, mas somente as de controle automático de temperatura são satisfatórias (KOLLMANN, CÔTÉ, 1968).

Outra abordagem para o método da secagem em estufa é descrito pela norma da ABNT NBR 14660, que reduz a amostra a serragem, fazendo com que o tempo de duração do ensaio seja significativamente reduzido.

3.4.2 Como o teor de umidade interfere no poder calorífico líquido

A umidade é uma variável muito importante para o aproveitamento, por meio da combustão, da energia contida na biomassa. A presença de água na biomassa afeta diretamente o poder calorífico líquido, até mais que a espécie, e essa relação é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o teor de umidade, menor o poder calorífico líquido (BRAND, 2010).

Além de dificultar a queima da biomassa, a água presente no material ainda aumenta o consumo de combustível, pois parte do calor gerado é usado para evaporar água. Isso aumenta o volume de produtos de combustão e os custos de transporte. A combustão em caldeiras de biomassa com alto teor de umidade provoca aceleração da corrosão da parte final da caldera e o acúmulo de sujeira nas superfícies de aquecimento (BRAND, 2010).

A quantidade de água livre no combustível determina a quantidade de energia efetivamente disponível para o sistema de geração de energia. Como cita BRAND (2010), quanto maior o teor de umidade, menor o poder calorífico líquido. Pode-se constatar que existe uma relação linear entre o teor de umidade e o poder calorífico líquido. Portanto, quanto menor a quantidade de água presente no material, maior a eficiência energética (BRAND, 2010).

Para Tillman (1978), o teor de umidade, além de influenciar significativamente o poder calorífico líquido, afeta também as propriedades de ignição e a eficiência energética. Ainda segundo Tillman, existe um limite prático de combustão para a biomassa de madeira, que vale para teores de umidade na base úmida maiores do que 67%. Isso significa que se a biomassa apresentar umidade acima de 67% no momento da combustão, ela demanda a mesma quantidade de energia do que gera, fazendo com que o balanço energético seja 0 ou inferior, demandando energia externa para a combustão (TILLMAN, 1978).

3.5 PODER CALORÍFICO

3.5.1 Definição

O poder calorífico é um excelente parâmetro de avaliação da potencialidade energética dos combustíveis. O poder calorífico de um material é expresso pelo conteúdo de energia térmica que é liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume, geralmente expresso em kJ/kg, kJ/m³, kcal/m³ ou ainda kcal/kg (NOGUEIRA, LORA, 2003).

O valor obtido nessa combustão completa do material é teórico, pois a determinação é feita em um recipiente hermeticamente fechado. A amostra é inserida no recipiente totalmente livre de umidade. Em seguida insere-se oxigênio gasoso com aproximadamente 99% de pureza para finalmente ser queimada pela ignição causada por uma descarga elétrica (VLOSSOV, 2001).

A bomba calorimétrica é envolvida com água, cuja temperatura é constantemente aferida durante a realização da análise. A variação da temperatura da água é utilizada para o cálculo da energia liberada pelo combustível, resultando no poder calorífico superior (BRAND, 2010).

3.5.2 Poder Calorífico Superior

O Poder Calorífico Superior (PCS) refere-se à quantidade de energia térmica liberada por um material em sua combustão completa quando este encontra-se seco, ou seja, com seu teor de umidade igual a zero. Quanto maior for este parâmetro, maior será a energia contida no combustível (BRITO, 1986).

No PCS a água formada durante o processo de combustão é condensada, recuperando o calor latente desta condensação. A quantidade de calor liberado durante a condensação do vapor de água e arrefecimento dos produtos da combustão é considerado até 25°C (BRITO, 1986).

3.5.3 Poder Calorífico Inferior

A partir do PCS, obtém-se o Poder Calorífico Inferior (PCI) do material. Quando não se considera o calor latente da condensação da água de ligação presente nos produtos de combustão, tem-se o PCI. Pode-se dizer que a diferença entre o PCS e o PCI é a energia gasta para evaporar a água formada durante a combustão a partir da oxidação do hidrogênio do combustível (VLASSOV, 2001), (CORTEZ, LORA & GÓMEZ, 2008).

De maneira simplificada, pode-se dizer que o PCI refere-se ao calor efetivamente possível de ser utilizado nos combustíveis, enquanto o PCS é em torno de 10 a 20% mais elevado. A norma ASTM E 711-87, *Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter*, é uma referência para este tipo de análise (NOGUEIRA, LORA, 2003).

Os combustíveis que originam H₂O nos produtos da combustão têm um poder calorífico superior e um poder calorífico inferior. Tanto o PCS quanto o PCI são calculados em base seca, ou seja, com 0% de umidade. Para evaporar o H₂O formado é consumido parte do calor gerado, resultando no PCI. Assim, segundo Vlassov (2001), o poder calorífico inferior pode ser calculado pela equação abaixo:

$$PCI = PCS - Q_w \quad (1)$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior

PCS = Poder calorífico superior

Q_w = Calor de condensação do vapor d'água nos produtos de combustão.

Considerando uma porcentagem média de 6% de hidrogênio na madeira e que para evaporar 1kg de água contida na madeira são necessários aproximadamente 556 kcal, ou 600 kcal para condensação de 1kg do vapor à

pressão atmosférica, os quais devem ser deduzidos do seu poder calorífico (BRITO & BARRICHELO, 1982).

No entanto, o PCI pode ser utilizado diretamente se o combustível não apresentar umidade livre, além da sua água de constituição. Quando o combustível apresentar umidade livre deve-se utilizar o PCI na base úmida ou poder calorífico líquido (VLASSOV, 2001).

Em aplicações industriais, a temperatura dos gases de saída geralmente é maior que a temperatura de condensação, portanto o calor latente não é utilizado. Por isso, o PCL é de maior aplicação (CORTEZ, LORA, GÓMEZ, 2008).

3.5.4 Poder Calorífico Líquido

O poder calorífico líquido (PCL) pode ser representado pelo poder calorífico superior descontada a energia térmica necessária para evaporar o hidrogênio e a água livre presentes no combustível (VLASSOV, 2001), (CORTEZ, LORA, GÓMEZ, 2008). Lehtovaara (2004) citado por Brand (2010) mostra que a equação 2 pode ser usada para determinar o PCL.

$$PCL = PCI [(100 - W)/100] - (6 \times W) \quad (2)$$

Onde:

PCL = Poder calorífico líquido

PCI = Poder calorífico inferior a 0% de umidade

W = % de umidade no combustível na base úmida

Ainda de acordo com Brand (2010), a diferença entre o poder calorífico determinado em bomba calorimétrica e o calculado é muito pequena, não sendo significativa, pois para efeito prático de uso da biomassa para geração de energia são consideradas significativas diferenças superiores a 300 kcal/kg (BRAND, 2010).

3.6 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA MADEIRA

A energia presente nas ligações entre os átomos que constituem as moléculas da biomassa pode ser transformada em energia térmica através de processos em combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos. Essa conversão tem o

objetivo de transformar o combustível, um material carbonáceo de baixa eficiência energética, isto é, pouca energia por unidade de volume, em um combustível de maior eficiência energética e com isso atingir uma maior viabilidade econômica. (CORTEZ, LORA, GÓMEZ, 2008).

As tecnologias para produção de eletricidade podem ser classificadas a partir da biomassa, como madeira, em dois grupos: aquelas que fazem uso desta enquanto recurso energético primário (a partir de sua combustão direta), e as tecnologias que fazem uso de combustíveis derivados da madeira como gases ou líquidos, (NOGUEIRA, LORA, 2003).

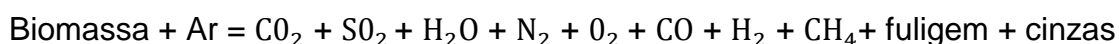
3.6.1 Combustão da Biomassa

A combustão propriamente dita é a queima do material em presença de oxigênio e é a tecnologia de conversão mais antiga e difundida comercialmente. A biomassa é um combustível rico em voláteis, que constituem quase 75% de seu peso seco, (NOGUEIRA, LORA, 2003).

O processo de combustão ocorre em 6 etapas consecutivas bem definidas: secagem, emissão de voláteis, ignição de voláteis, queima de voláteis em chama, extinção da chama dos voláteis e por último a combustão do resíduo de carbono, também denominado de coque (NOGUEIRA, LORA, 2003).

O processo de combustão da biomassa ocorre de uma forma homogênea até a etapa de queima dos voláteis e, em seguida, ao se chegar na fase de combustão do resíduo de carbono, ocorre de forma heterogênea. Geralmente a velocidade das fases iniciais é superior à da última fase, quando o combustível queima no estado sólido, mas isso depende da relação ar/combustível existente em cada etapa (NOGUEIRA, LORA, 2003).

A reação de combustão da biomassa com o ar pode ser representada segundo o seguinte esquema :



No caso da biomassa, os grupos de compostos formados são:

a) Produtos da oxidação completa: CO_2 , SO_2 , e H_2O . Como o conteúdo de enxofre da biomassa é sempre baixo, a percentagem de SO_2 é quase desprezível.

b) Ar em excesso ($N_2 + O_2$) e eventualmente a umidade do combustível e do ar.

c) Produtos gasosos ($CO + H_2 + CH_4$) e sólidos (fuligem) de combustão incompleta.

Fração mineral não combustível da biomassa (cinzas).

3.6.2 Pirólise

A pirólise, que pode também ser denominada destilação seca, é o processo de queima da madeira em atmosfera controlada, com limitação de agentes oxidantes como é o oxigênio gasoso (O_2) na maior parte dos casos. A biomassa é aquecida a temperaturas relativamente baixas de 500-800°C e se transforma em resíduo sólido rico em carbono, o carvão propriamente dito, e em uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis, que também pode ser chamado de licor pirolenhoso (CORTEZ, LORA, GÓMEZ, 2008).

O processo de pirólise consiste de transferência de calor e massa. As reações que acontecem diretamente sobre o material celulósico são denominadas reações primárias e as que incidem na decomposição dos produtos intermediários são denominadas reações secundárias. Essas reações ocorrem durante a degradação dos principais componentes da biomassa: a hemicelulose, celulose e lignina. O processo ocorre em três etapas. Na primeira, a biomassa absorve calor e libera umidade. Esta fase ocorre abaixo de 180°C. Em seguida, entre 110-180°C, acontece as reações de desidratação que envolvem os grupos $-OH$ presentes nas moléculas dos polissacarídeos (CORTEZ, LORA, GÓMEZ, 2008).

Na segunda etapa começam as reações de pirólise propriamente ditas. Entre 180-290°C acontece a degradação da hemicelulose. Nesta fase são liberadas pequenas quantidades de CO , CO_2 e ácido acético na forma de voláteis. A partir de 250°C as reações começam a liberar calor para o meio, ou seja, tornam-se exotérmicas. Entre 290-370°C acontece a degradação total da celulose e a quebra das ligações glicosídicas dos polissacarídeos, dando lugar a uma grande emissão de voláteis, compostos por vapores orgânicos e altas concentrações de CO , H_2 , CH_4 , e CO_2 , ácido acético, metanol e acetona. O alcatrão começa a se formar (CORTEZ, LORA, GÓMEZ, 2008).

A terceira e última etapa acontece acima de 370°C. Nessa etapa a lignina se degrada por completo, ocorre a formação de alcatrão pesado e de alguns hidrocarbonetos. A degradação da lignina é responsável pela formação de cerca de 50% do carbono fixo no material sólido (CORTEZ, LORA, GÓMEZ, 2008).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 COLETA DE AMOSTRAS

A coleta das 48 amostras foi feita no momento de descarga do caminhão no pátio da Cocelpa. Um colaborador aguardava o caminhão descarregar toda a carga e retirava as amostras de pontos distintos da pilha de cavacos. No mesmo instante as amostras eram colocadas e seladas em sacos plásticos e encaminhadas para o Laboratório de Energia da Madeira da Universidade Federal do Paraná em Curitiba, Paraná.

4.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

As análises de umidade foram realizadas pelo Laboratório de Energia da Madeira da Universidade Federal do Paraná. A metodologia usada seguiu a norma NBR 7993 da ABNT – Madeira. As amostras foram reduzidas a serragem e em seguida colocadas na estufa de secagem a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$.

4.3 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO

As análises do poder calorífico foram realizadas pelo Laboratório de Energia da Madeira da Universidade Federal do Paraná conforme a norma NBR 8633 da ABNT, utilizando-se um calorímetro (bomba) automático, marca IKA WORKS modelo C5000 com princípio de funcionamento adiabático, isoperibólico ou dinâmico. A estimativa de poder calorífico em função da umidade foi feita com base em SILVA (2001) e KOLLMAN et al. (1968). Os valores foram expressos em Kcal/Kg.

4.4 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram analisados por meio de um ajuste de um modelo de análise de regressão linear pelo programa Microsoft Excel. Esta análise consistiu em relacionar as variáveis de difícil obtenção, poder calorífico superior, com uma variável de fácil obtenção, o teor de umidade. Ou seja, esta análise obteve uma equação que

explica a variação da variável dependente (Y, PCL) pela variação do nível da variável independente (X, teor de umidade).

Para tentar encontrar a equação que melhor representou a relação entre o PCL e o teor de umidade na base úmida, foi feito um gráfico, chamado de diagrama de dispersão, para verificar como os valores de Y se comportam em função da variável X. Essa relação pode ser linear, quadrática, cúbica, exponencial, logarítmica, etc. Para determinar qual o modelo que melhor explica relação entre as variáveis estudadas, deve-se verificar qual tipo de equação que mais se aproxima dos pontos representados no diagrama de dispersão. Portanto na fase inicial da coleta de dados foram construídos gráficos que tornaram possível verificar o tipo de distribuição que os dados possuíam.

Após a construção dos gráficos de dispersão, o estudo em questão consistiu em descrever a relação entre as variáveis dependente “Y” (poder calorífico) e independente “X” (teor de umidade da biomassa). Sendo dado pelo modelo

$$Y_i = B_0 + B_1X_i + e_i \quad (3)$$

em que

Y_i = valor observado para a variável dependente Y no i-ésimo nível da variável independente X.

B_0 = coeficiente de regressão. Representa a interseção da reta com o eixo dos Y.

B_1 = coeficiente de regressão. Representa a variação de Y em função da variação de uma unidade da variável X.

X_i = i-ésimo nível da variável independente X ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

e_i = é o erro que está associado à distância entre o valor observado Y_i e o correspondente ponto na curva, para o modelo proposto, para o mesmo nível i de X.

Optou-se por esse modelo pois há correlação linear observada na literatura entre os dois parâmetros analisados.

Foi testada a hipótese de relação entre X e Y por meio da análise de variância da regressão em nível de significância de 95%. Para análise do modelo foi verificado o S_{xy} (erro padrão de estimativa) e o R^2 correlação entre as variáveis, ($0 \leq R^2 \leq 1$).

Foram testados os modelos seguindo o seguinte esquema:

- a) Modelo 1: biomassa de Pinus sp. de origem de serrarias;
- b) Modelo 2: biomassa de resíduos urbanos;
- c) Modelo 3: biomassa de mistura de Pinus sp. + resíduos urbanos.

Após o ajuste das equações determinou-se os melhores modelos buscando o maior valor de R^2_{ajustado} e o menor valor de erro padrão de estimativa.

5 RESULTADOS

A Tabela 4 mostra o resultado das análises do teor de umidade na base úmida e a Tabela 5 mostra o resultado das análises do poder calorífico líquido para os três modelos.

TABELA 4 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA

Modelo	Origem	Número de amostras	Teor de umidade na base úmida				
			Mínimo (valor absoluto)	Máximo (valor absoluto)	Médio (valor absoluto)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
1	Pinus	16	0,1526	0,5219	0,423981	0,090683	21,39%
2	Resíduos urbanos	26	0,1483	0,5896	0,274435	0,113961	41,53%
3	Misto	48	0,075273	0,520636	0,313283	0,125095	39,93%

FONTE: O AUTOR (2014).

TABELA 5 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE PODER CALORÍFICO LÍQUIDO

Modelo	Origem	Número de amostras	Poder Calorífico Líquido				
			Mínimo (kcal/kg)	Máximo (kcal/kg)	Médio (kcal/kg)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
1	Pinus	16	1742	3540	2275,438	442,1114	19,43%
2	Resíduos urbanos	26	1356	3592	2930,538	583,1006	19,90%
3	Misto	48	1432	4175	2621,385	667,6195	25,47%

FONTE: O AUTOR (2014).

Os (GRÁFICOS 1, 2 e 3) mostram o padrão de dispersão dos modelos ajustados.

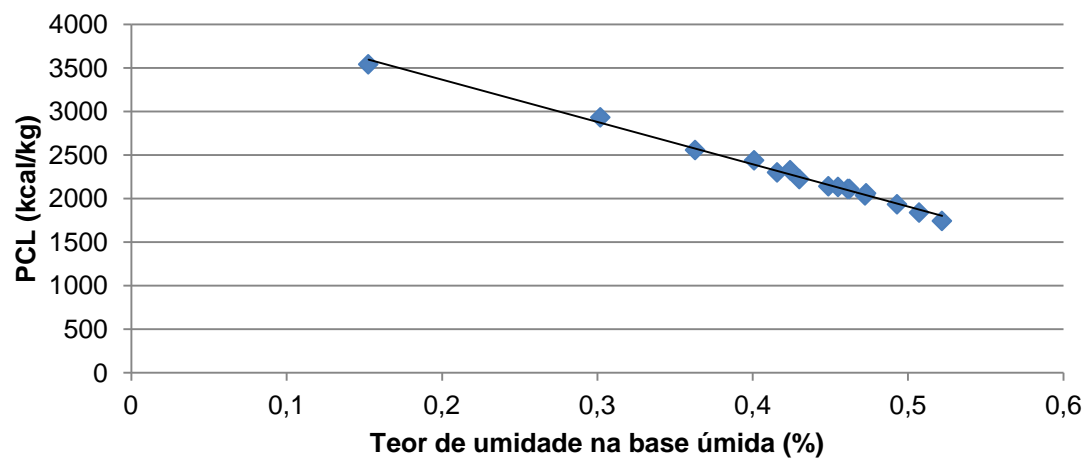


GRÁFICO 1 – RELAÇÃO ENTRE O PCL E O TEOR DE UMIDADE NA BASE UMIDADE PARA PINUS
 FONTE: O AUTOR (2014).

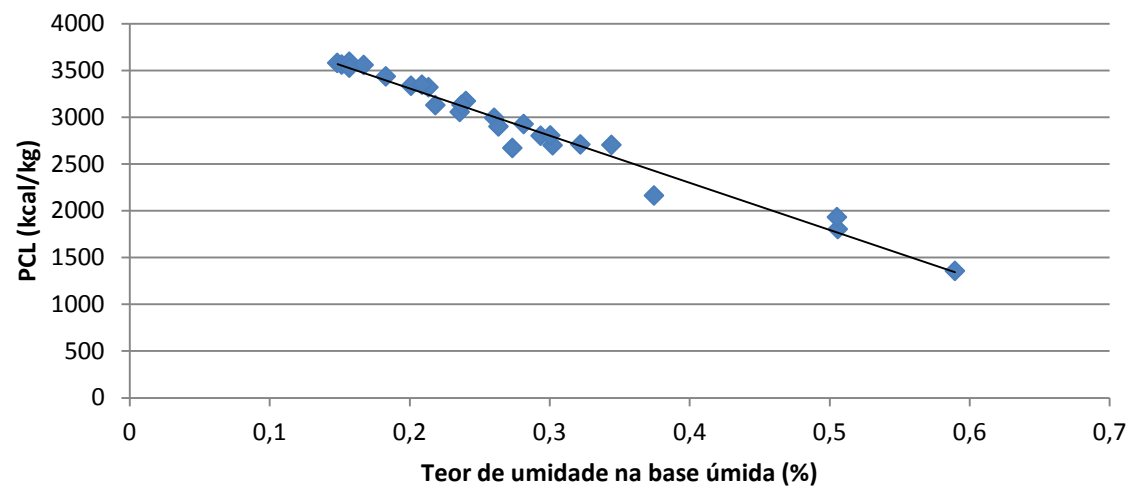


GRÁFICO 2 – RELAÇÃO ENTRE O PCL E O TEOR DE UMIDADE NA BASE UMIDADE PARA RESÍDUOS
 FONTE: O AUTOR (2014).

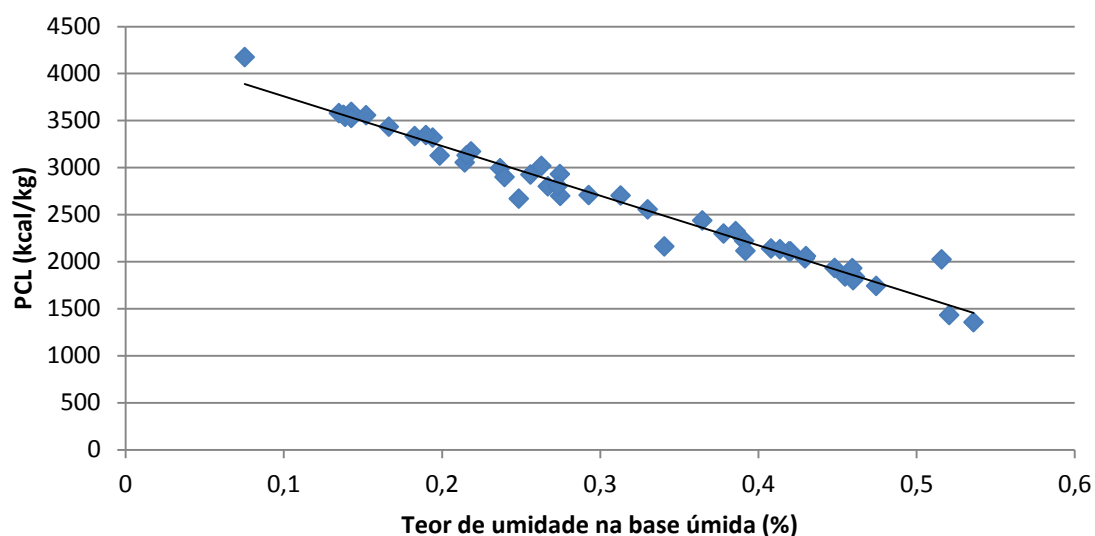


GRÁFICO 3 – RELAÇÃO ENTRE O PCL E O TEOR DE UMIDADE NA BASE UMIDADE PARA A MISTURA DE BIOMASSA
 FONTE: O AUTOR (2014).

Nos Gráficos 1, 2 e 3 a situação mais evidente é a relação linear decrescente entre o teor de umidade na base úmida e o poder calorífico líquido, não importando a origem e espécie da biomassa.

A relação linear decrescente entre as variáveis estudadas é bem relatada na literatura (BRAND, 2010; SILVA 2001). Essa relação é natural e é coerente, uma vez que a biomassa com maior teor de umidade usará parte da energia fornecida externamente pela queima em reações endotérmica, de evaporação e com isso reduzindo o calor útil, ou seja, o poder calorífico líquido.

Como as dispersões indicaram uma tendência à linearidade, aplicou-se modelos lineares ($Y_i = B_0 + B_1X_i + e_i$). Por meio de uma análise simples e de menor custo, que é o caso da determinação do teor de umidade, podemos estimar o PCL com bastante precisão. A desvantagem da utilização deste modelo é que, cada vez que é utilizado, pode-se incorrer em erros experimentais na tomada das variáveis e erros matemáticos no ajuste do modelo. Para evitar esses problemas deve-se seguir rotinas rigorosas na tomada das variáveis e selecionar modelos com baixos níveis de erros experimentais.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores das análises de variância de regressão:

TABELA 6 – APRESENTAÇÃO DOS VALORES DE AJUSTE DE EQUAÇÃO

Modelo	Origem	F _{calculado}	F _{crítico}	p-valor
1	Pinus	2160,732	$9,6252 \times 10^{-17}$	1,46E-20
2	Resíduos urbanos	796,1332	$6,4444 \times 10^{-20}$	8,94306E-24
3	Misto	1401,8914	$4,1823 \times 10^{-36}$	3,58575E-45

FONTE: O AUTOR (2014).

A Tabela 6 mostra que todos os modelos testados apresentaram regressão linear significativa, pois o $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$ e os níveis de significância mostram que a relação PCL x Teor de umidade na base úmida foi altamente significativa. Esse fato já era esperado, pois a relação linear entre essas duas variáveis já é consolidada. No entanto, neste estudo em particular, o ajuste do modelo proporciona versatilidade para a empresa, pois a partir de variável de fácil determinação pode-se planejar suas operações.

A Tabela 7 mostra a comparação entre os modelos para os valores de S_{xy} e R^2 .

TABELA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS ESTUDADOS

Modelo	Biomassa	S_{xy}	R^2	Modelo
1	Pinus	0,007531295	0,993562426	$y = -4859,6x + 4335,8$
2	Resíduos urbanos	0,019896765	0,970736459	$y = -5041,3x + 4314$
3	Misto (pinus + resíduos)	0,02242708	0,968229662	$y = -5283,8x + 4287,5$

FONTE: O AUTOR (2014).

Observa-se na tabela que o modelo misto obteve um menor desempenho quando comparado aos outros modelos. Isso evidencia-se pelo valor de R^2 de 0,9683. Esse valor não é inexpressivo, mas, quando comparado aos outros dois modelos, nota-se que é ligeiramente menos preciso. O modelo dos resíduos urbanos obteve performance intermediária, e o modelo Pinus representou o melhor ajuste. Ao observar os erros de estimativa dos modelos nota-se novamente que o modelo com menor precisão é o modelo misto e o com o menor erro é o modelo de Pinus.

Com os dados da Tabela 7 pode-se concluir que, ao utilizar os modelos, pode-se separar a biomassa por origem, objetivando maior precisão na obtenção do poder calorífico líquido.

Isso representará uma vantagem no processo de gestão da geração de energia, pois, com a utilização dos modelos, a informação do PCL, que demorava

dias e demandava altos custos para ser obtida, pode ser realizada em questão de minutos utilizando-se uma balança UV de umidade dentro da própria empresa.

A empresa ao utilizar os modelos, pode estabelecer uma relação PCI x custo, determinando assim o fornecedor que oferece o material mais vantajoso relacionando-se o calor útil gerado e o custo por unidade de calor e com isso eventualmente diminuir os custos de geração de vapor.

Sabendo que o frete é calculado pelo peso e pela distância da carga a ser transportada e que o teor de umidade representa a quantidade de água no material, a empresa pode diminuir os custos com o frete comprando material mais seco. Além disso um material mais seco diminui o desgaste nos equipamentos pois necessita-se de menor quantidade de material para gerar o mesmo calor, comparando-se com um material com maior teor de umidade. Há várias empresas que comercializam material considerado seco, ou seja, com um teor de umidade menor do que 30% na base úmida. A indicação de alguns especialistas é que a biomassa tenha um teor de umidade na base úmida menor do que 30%.

Outro ponto importante diz respeito às emissões de gases de combustão. Com o material com maior teor de umidade, necessita-se grandes quantidades de ar para realizar a queima e para retirar o vapor formado pela água presente na biomassa. Muitas vezes os ventiladores e exaustores não conseguem suprir essa demanda e acaba faltando ar, ou seja, oxigênio, na queima e com isso o equilíbrio estequiométrico da combustão é afetado, produzindo-se monóxido de carbono (CO) que além de mais poluente que o dióxido de carbono (CO₂) produz menos calor útil.

Novos estudos nessa área devem ser realizados, a fim de medir o teor de cinzas para fornecer novas evidências da melhor utilização possível de biomassa florestal e urbana pela empresa.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo contribuiu para o processo produtivo da empresa em que foi realizado, uma vez que forneceu informações pertinentes a gestão da biomassa e da geração de energia.

Percebe-se que na biomassa analisada há uma relação inversa entre teor de umidade e PCL. Isso pode ser entendido como, quanto maior a quantidade de água presente na biomassa, menor o calor útil gerado na combustão e possivelmente maior os gastos da empresa com transporte, com desgaste dos equipamentos...etc.

Foi possível estabelecer um modelo matemático que prevê o PCL a partir do teor de umidade da biomassa, e isto contribuiu de forma significativa com a empresa pois a análise de umidade pode ser feita de forma simples e sem muitos custos. A estimativa do PCL a partir do teor de umidade na base úmida utilizando as equações presentes neste estudo, levando em conta a origem da biomassa, é muito útil, pois a empresa passa a saber quanto calor útil a biomassa em análise é capaz de gerar e com isso determina quais fornecedores tem a biomassa com o melhor custo x calor útil.

Recomendações: Utilizar o modelos respeitando a origem da biomassa para calcular o PCL, pois assim o erro de estimativa será menor. Futuros estudos sobre a gestão e logística da biomassa devem ser feitos para possivelmente traduzirem-se em ganhos econômicos para a empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BONDUELLE, A.; YAMAJI, F. M.; BORGES, C. C. **Resíduo de pinus: uma fonte para novos produtos**. Disponível em: <www.remade.com.br>. Acesso em: 12 jun. 2014.

Bracelpa. Conjuntura. Disponível em:

<<http://bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/conjuntura/CB-064.pdf>> . Acesso em: 23 jul. 2014.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para uso na geração de energia em função da estocagem**. Disponível em

<www.dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/10397/Tese-vers%3Fo%20final%20-%20Martha%20Andreia%20Brand.pdf?sequence=1> .

Acesso em: 20 fev. 2014.

_____. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro. Interciência. 2010

_____. **Rendimento do processo produtivo e energético da matéria-prima de uma indústria de base florestal**. Dissertação de mestrado (UFPR). Curitiba, 163 pag. 2000.

BRITO, José Otávio. **O uso energético da madeira**. Disponível em:

<www.inee.org.br/down_loads/eventos/JoseBrito%20ESALQ.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2014.

_____. **Madeira para energia: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais**. Silvicultura. Ano XI. Edição especial, 1986.

BRITO, J. O., BARRICHELO, L. E. G. **Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis**. In: Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais, 2, 1982, São Paulo. Anais... São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1982.

CORTEZ, L. A., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O. **Biomassa Para Energia**. São Paulo: Editora Unicamp, 2008.

FERREIRA, A. B. H. **Aurélio século XXI: o dicionário da Língua Portuguesa**. 3ª ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999. 2128p.

KLITZKE, R. J. **Curso de Secagem da Madeira**. UFPR. Disponível em:

<www.madeira.ufpr.br/graduacao/secagemmadeira.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.

KLOCK, U., MUÑIZ, G. I. B., HERNANDEZ, J. A. **Química da Madeira**. Série didática FUPEF. 3ª ed. Curitiba: FUPEF. 2006. 82 p.

KOLLMANN, F. F. P., CÔTÉ, W. A. Jr. **Principles of Wood Science and Technology**. Volume 1. Berlin: Springer-Verlag, 1968.

LORA, E. E. S., AYARZA, J. A. C. **Gaseificação**. CORTEZ, Luis Augusto Barbosa (Org). **Biomassa Para Energia**. Campinas-SP: Editora Unicamp, 2008. p. 241-327.

MANO, E. B.; PACHECO, E. B. A. V.; BONELLI, C. M. C. **Meio Ambiente, Poluição e Reciclagem**. São Paulo: Blucher, 2000.

MARCENE, E. A.; Corte, A. P. D.; Sanquetta, C. R.; Schneider, C. R. **Variação nos teores e estoques individuais de carbono fixado com o crescimento de Gmelina arborea Roxb. na região litorânea do Paraná, Brasil**. Scientia Florestalis. 2005.

MARON, A.; NEVES, J. M. **Utilização de misturas de cavacos industriais com resíduos de serraria provenientes de madeira de Eucalyptus grandis de diferentes idades para produção de Pasta Kraft**. *Revista Ciência Florestal*, v. 14, n. 1, p. 205-221, 2004.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2013**. Ano base 2012. Empresa de pesquisa energética. Disponível em: <www.ben.epe.gov.br>. Acesso em: 12 jun. 2014.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da Madeira**. Apostila didática FUPEF, 4ª ed., Curitiba: FUPEF, 2005.

NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. – 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

SILVA, D. A., **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis compensados**. Tese de doutorado em ciências florestais – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SOUZA, Samuel N. M. de, SORDI, Alexandre and OLIVA, Carlos A. **Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná: 4º Encontro de Energia no Meio Rural**, 4., Campinas, 2002. Disponível em <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200042&lng=en&nrm=abn> Acesso em: 28 ago. 2014

TILLMAN, D. A. **Wood as an Energy Resource**. Nova Iorque: Academic Press, 1978.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora UFPR, 2001.